

doi:10.3799/dqkx.2011.012

四川盆地东部黄龙组碳酸盐岩储层沉积—成岩系统

文国华, 郑荣才, 沈忠民

成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 四川盆地东部上石炭统黄龙组是天然气藏的主力产层。在岩心观察、野外剖面实测和室内薄片鉴定分析的基础上, 结合钻井、测井、物性分析和 X-衍射分析资料, 对川东黄龙组碳酸盐岩储层沉积—成岩系统进行了深入研究。认为川东黄龙组主要发育萨勃哈、有障壁海岸和陆棚 3 个相带以及特殊的古喀斯特相, 储集岩类型以白云质岩溶角砾岩及颗粒白云岩为主, 有效的储集空间类型主要为晶间孔、晶间溶孔, 最重要的储层类型为孔洞缝型, 最有利储层发育部位为岩溶上斜坡中的坡地和残丘微地貌单元。综合分析认为, 沉积—成岩系统与储层在时空上具有良好的耦合关系, 粒屑滩沉积微相控制了黄龙组储层的区域分布, 早—中成岩阶段压实卤水成岩系统、古表生期大气水成岩系统以及埋藏成岩阶段的温压水成岩系统对优质储层发育贡献最大。

关键词: 沉积相; 白云石化; 古岩溶; 碳酸盐岩储层; 沉积—成岩系统; 石炭系; 黄龙组; 川东。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)01-0111-11

收稿日期: 2010-07-10

Sedimentary-Diagenetic Systems of Carbonatite Reservoirs in the Huanglong Formation, Eastern Sichuan Basin

WEN Hua-guo, ZHENG Rong-cai, SHEN Zhong-min

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The Huanglong Formation of Upper Carboniferous in eastern Sichuan basin, is the principal producing formation of natural gas pool. Based on the observation of cores, actual measurement of outdoors sections and analysis of thin section, and the data of well drilling, well logging, physical property analysis and X-diffraction analysis, we have studied the sedimentary-diagenetic system of carbonatite reservoirs in the Huanglong Formation, eastern Sichuan basin. It is believed that the Huanglong Formation mainly developed three facies belts, including sabkha, barrier coast and continental shelf, and particular palaeokarst facies. The types of reservoir rocks are mainly grain dolomite and dolomitic-karst breccia. The effective reservoir interspaces are mainly intercrystal pore and dissolved pore. The most important types of reservoir is cavity-seam. The beneficial localization for the development of reservoirs is the microtopography unit of hillsides and residual hills on sur-slope of palaeokarst. According to the studies above-mentioned, it is proposed that the sedimentary-diagenetic system has a good coupling relationship with reservoirs on time and space. The particles shoal of sedimentary microfacies controls the distribution of location regional of reservoirs. The diagenetic system of compaction-bittern of early-middle diagenetic stage, the diagenetic system of atmospheric water of paleo-hypergene stage and the diagenetic system of thermobaric-water of burial diagenetic stage contribute much to the development of goodness reservoirs.

Key words: sedimentary facies; dolomitic; palaeokarst; carbonatite reservoirs; sedimentary-diagenetic system; Carboniferous; Huanglong Formation; eastern Sichuan basin.

含油气盆地沉积和成岩作用所构建的沉积—成岩系统与储层在时间—空间上的匹配关系, 是当今沉积学及石油地质学界最前缘的研究热点之一

(Milliken, 2003; 李忠等, 2006; 李忠和刘嘉庆, 2009; 刘宝珺, 2009; 张胜斌等, 2009), 已发展成为沉积岩石学、石油地质学与各种测试技术相互渗透的

一门新兴边缘学科(李忠,1990,1998;刘宝珺和张锦泉,1992;刘孟慧等,1993;孟元林等,2003;焦养泉等,2004;鲜本忠等,2004;张育民等,2005;李忠等,2006;李忠和刘嘉庆,2009;刘宝珺,2009). 沉积与成岩是盆地地质作用中两个相连续、但完全不同的地质过程,由于成岩对沉积的继承性,从沉积微相入手研究成岩作用,可更有效地为储层预测提供地质依据(刘孟慧等,1993;樊爱萍等,2009;李忠和刘嘉庆,2009;刘宝珺,2009;王瑞飞和孙卫,2009). 四川盆地东部(以下简称川东)上石炭统黄龙组(C_2hl)储层成因及其控制因素和分布规律研究已成为该地区油气勘探领域最重要的基础地质任务之一. 前人对该地区黄龙组沉积相和成岩作用特征的研究虽然已积累了丰富的资料(郭一华,1994;郑荣才等,1995,1996,1997,2003,2008;王一刚等,1996;郑荣才和陈洪德,1997;李淳,1998;胡忠贵等,2008;文华国等,2009a),但对沉积—成岩系统与储层发育关系的研究仍较为薄弱(郑荣才等,2010),本文旨在已有研究成果(郑荣才等,1995,1996,1997,2003,2008;王一刚等,1996;李淳,1998;胡忠贵等,2008;文华国等,2009a,2009b)的基础上,从沉积—成岩系统角度出发对该地区黄龙组沉积相、成岩作用与储层的时空匹配关系进行深入研究,客观地预测和评价储层

发育和分布规律,为下一步勘探目标优选提供依据.

1 区域地质概况

研究区东起七跃山,西到华蓥山,北抵大巴山,南达重庆—开隆一线,面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是四川盆地稳定地块中的相对构造活动区,区内自西向东分布有多个北东东—北东向的高陡背斜构造带(图 1). 晚石炭世黄龙期川东地区位于扬子板块东侧的川鄂克拉通盆地西部,为一个相对封闭的海湾盆地. 黄龙组为一套蒸发岩—碳酸盐岩沉积建造,除东部整合于下石炭统河洲组滨、浅海相碎屑岩之上,主体不整合超覆在中志留统韩家店组浅海陆棚相的暗色泥页岩之上. 晚石炭世末期由于受海西早期云南运动构造隆升和强烈侵蚀影响,黄龙组在经历了短暂的浅埋藏成岩作用后,旋即进入长达 $15 \sim 20 \text{ Ma}$ 的古表生期广泛岩溶改造,形成顶部的古喀斯特地貌及层内的古岩溶体系(郑荣才等,2003). 其上被下二叠统梁山组(P_1l)煤系地层掩埋后进入再埋藏期成岩后生改造阶段,并经历了印支期和燕山期多次构造变形和破裂作用改造,以及燕山晚期—喜马拉雅期的天然气运移和聚集作用,在局部有利的构造区带形成古潜山气藏,其潜在天然气资源极

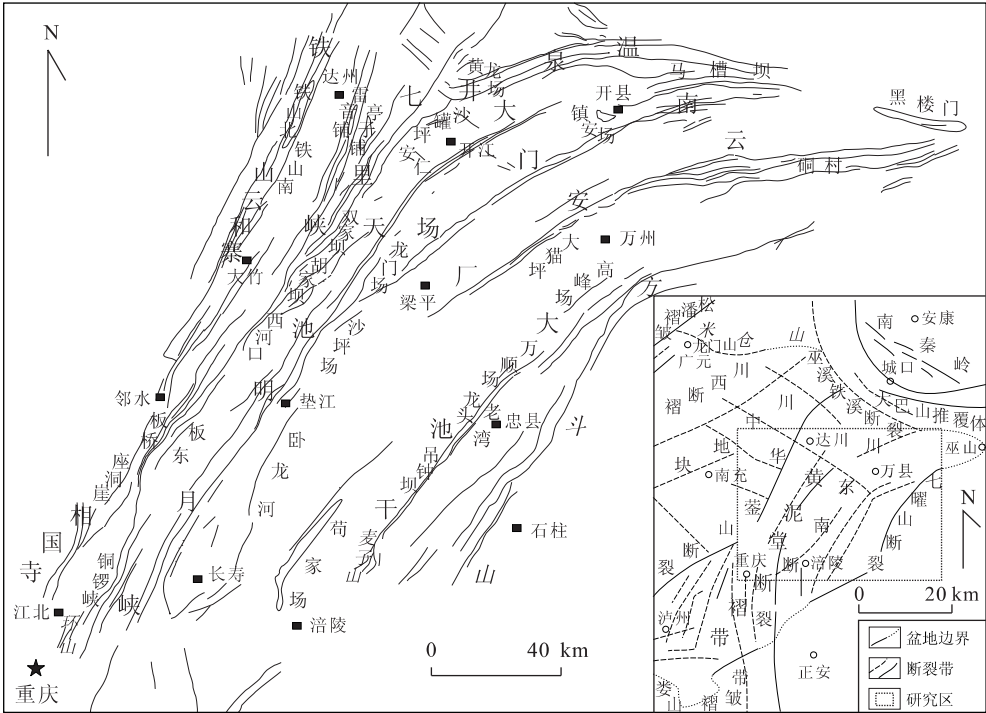


图 1 四川盆地东部构造分布(据文华国等,2009a,2009b)
Fig. 1 Distribution of construction in eastern Sichuan basin

其丰富,具备巨大的勘探开发潜力和资源经济效益.

2 沉积相特征

通过研究区内 120 余口钻井岩心、录井和测井资料及数条野外实测剖面的沉积相特征综合研究,把黄龙组自下而上划分为 3 个岩性段(图 2),并进一步划分出萨勃哈、有障壁海岸和陆棚 3 个相及若干亚相、微相类型:一段(C_2hl^1),为去膏化去云化次生灰岩与泥—微晶白云岩互层组合,属萨勃哈沉积,夹有次生灰质岩溶角砾岩,残厚 1.0~5.0 m;二段(C_2hl^2),为颗粒白云岩、粉—细晶白云岩和微晶白云岩互层组合,产有丰富的有孔虫化石,属于局限海湾泻湖—潮坪和半局限海湾陆棚泥与浅滩微相的互层沉积组合,频繁地夹有白云质岩溶角砾岩,残厚 12~50 m;三段(C_2hl^3),为亮晶粒屑灰岩、微晶粒屑灰岩与粒屑微晶灰岩和泥—微晶灰岩互层组合,产有丰富的有孔虫、鲕、腕足、棘皮等化石,属于开阔海湾陆棚潮下静水泥和浅滩微相沉积组合,残厚 0~20 m,也频繁地夹有灰质岩溶角砾岩.

作为地史中曾经历过的岩溶地貌演化阶段及其对碳酸盐岩进行岩溶改造形成岩溶型储层有重要作用(Kerans,1988;郭建华,1993),本文将晚石炭世晚期由古表生期区域性岩溶作用形成的黄龙组顶面特殊地貌作为一个单独的古地理单元、即喀斯特相进行研究,根据岩溶相和地形起伏变化特征,可将川东黄龙组古岩溶地貌划分为岩溶高地(或残丘)、斜坡和盆地 3 个地貌单元的亚相和包括峰丛、溶沟、落水洞、坡地、谷地、浅洼、残丘和槽地等在内的众多微地貌单元,其中以岩溶斜坡亚相的微地貌单元组合最复杂.

从晚石炭世黄龙期沉积格局上看,研究区东、西两侧分别与鄂西海槽和甘孜海槽相通,盆内为局限海湾而盆外为开阔海,沉积作用具有自东向西和由北向南,由盆外低地向盆内高地和周缘古陆方向逐层上超和减薄的演化特点,其中黄龙组一段沉积期处于古陆边缘的相对局限和蒸发作用强烈的局限海湾内,以发育萨勃哈为主;黄龙组二段为广泛海侵沉积期,伴随海水大面积向古陆方向推进,整个川东地区呈现开阔—局限海湾陆棚→障壁粒屑滩→泻湖、

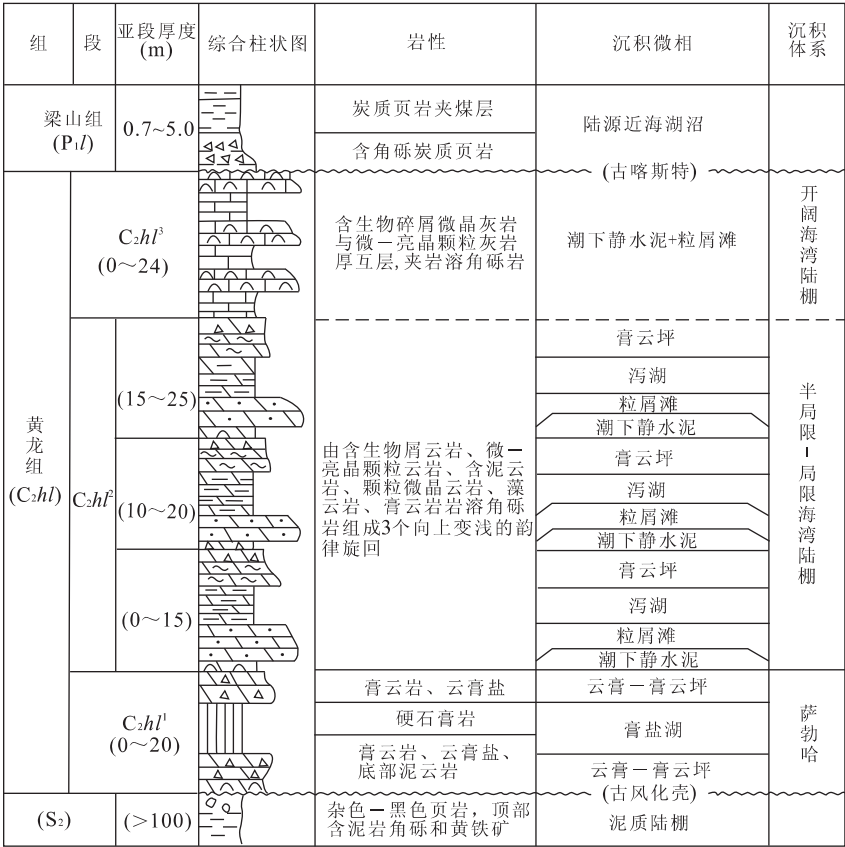


图 2 川东黄龙组岩性与沉积相综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of lithology and sedimentary facies of Huanglong Formation in eastern Sichuan basin

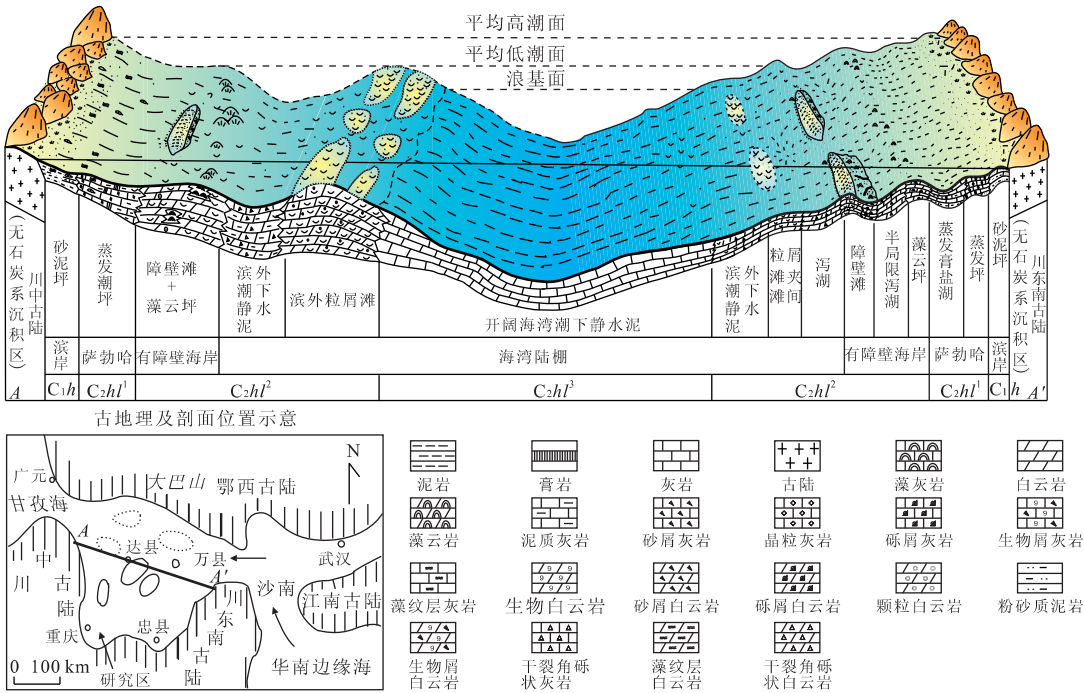


图 3 四川盆地东部黄龙组沉积模式

Fig. 3 Sedimentary model of Huanglong Formation in eastern Sichuan basin

潮坪的递变演化规律;黄龙组三段沉积期海域继续扩大,以发育开阔海湾陆棚背景条件下的潮下静水泥沉积为主(图 3)。

3 黄龙组储层特征

3.1 储层岩石类型及孔隙类型

据镜下薄片鉴定,黄龙组岩石类型多样,将区内黄龙组碳酸盐岩分为石灰岩和白云岩两大类,并细分为以下不同的岩石类型,其中灰岩类包括微—粉晶灰岩和含生屑微晶灰岩、泥—微晶或亮晶颗粒灰岩、去云化粉—细晶次生灰岩和变形灰岩;白云岩类包括微晶白云岩、粉晶—细晶白云岩、白云质岩溶角砾岩(郑荣才等,1996)、去云化粉晶—细晶云灰岩和残余颗粒粉晶白云岩。黄龙组储层主要发育于二段,呈层状和似层状、透镜状分布,储集岩类型以白云质岩溶角砾岩及颗粒白云岩为主,而大部分正常海相灰岩类和次生灰岩类岩性较致密而不太有利于储层发育。

根据产气井的岩石孔隙类型统计,认为川东黄龙组碳酸盐岩储层的储集空间类型主要有晶间孔、晶间溶孔、晶间孔叠加晶间溶孔、粒内溶孔、粒间溶孔、铸模孔和裂缝等,而有效的储集空间更多的是晶间孔、晶间溶孔,其次为粒间溶孔和粒内溶孔,而未充填的裂溶缝为有效的运移通道,大多数储层属于

以次生孔隙为主的裂缝—孔隙型储层,在储层中晶间溶孔的发育程度,埋藏期溶蚀作用形成粒间溶孔的相连程度以及溶孔与溶缝相连程度,对有效储层的形成起着至关重要的作用。

3.2 储层类型

川东地区黄龙组碳酸盐岩受到长期的大气水风化、剥蚀和溶蚀作用改造,由孔隙、溶洞和裂缝组成的储集空间非常发育(王一刚等,1996;张兵等,2010),由孔、洞、缝的不同组合方式及其所占比例的差异性导致了储集空间的复杂性,据此,进一步将储层划分为 3 种类型:(1)孔洞缝型储层,主要出现在颗粒—晶粒白云岩中,孔隙度为 0.55%~15.17%,平均值高达 4.15%,渗透率分布在 $(0.01 \sim 96.08) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均值高达 $12.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集空间以粒间溶孔、晶间溶孔为主,微裂缝也比较发育;(2)孔隙型储层,主要发育在白云质岩溶角砾岩、灰质白云岩中,孔隙度为 0.32%~14.94%,平均值 3.51%,渗透率分布在 $(0.01 \sim 53.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值在 $13.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,储集空间以粒间孔、粒内孔为主,微裂缝相对不发育;(3)裂缝型储层,主要分布在晶粒灰岩、泥微晶灰岩中,在胶结作用较强的白云质岩溶角砾岩、生物碎屑白云岩中也有一定程度的发育,孔隙度为 0.29%~2.76%,平均值为 1.12%,渗透率分布在 $(0.01 \sim 0.57) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平

均值约 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. 在各种类型的储层中,孔洞缝型储层是川东黄龙组最重要的储层类型.

4 黄龙组储层成岩作用特征

川东黄龙组碳酸盐岩储层成岩作用类型众多,主要有胶结作用、新生变形作用、压实和压溶作用、膏化作用、白云岩(或白云石)化作用、古岩溶作用、去膏去云化作用、重结晶作用、深部溶蚀作用、硅化和黄铁矿化作用以及破裂作用等,此外,还偶见有钠

长石化、天青石化、高岭石化等成岩现象. 按成岩作用与储层发育关系可划分为破坏性和建设性两种成岩作用类型,其中与储层发育关系最为密切且最有利于储层发育的成岩作用为白云石化作用和古岩溶作用. 结合研究区特定的成岩—孔隙演化历史,参照国家碳酸盐岩成岩阶段划分标准(SY/T 5478-2003),将川东黄龙组储层的成岩演化过程划分为准同生阶段、早—中成岩阶段、古表生阶段、再埋藏期中—晚成岩阶段和构造隆升阶段共计 5 个成岩期次,并建立了成岩演化模式(图 4).



图 4 川东黄龙组成岩阶段划分和演化模式(据郑荣才等,2010 修改)

Fig. 4 Diagenetic stage dividing and evolution pattern of Huanglong Formation in eastern Sichuan basin

5 沉积—成岩系统与储层发育的关系

前人对成岩作用的研究主要是强调演化阶段或者岩类,而很少将成岩作用上升到成岩系统来进行研究(李忠等,2006).在含油气盆地中,由于储层发育连续地受到沉积与成岩作用影响,因此,将沉积作用与成岩作用纳入到统一的系统中研究储层发育以及沉积和成岩作用与储层在时空上的耦合关系,具有重要的理论和实践意义.

5.1 沉积相对储层发育的控制

沉积相控制了川东黄龙组碳酸盐岩储层的分布范围,特别是粒屑滩沉积微相控制了储层的区域分布位置和分布规律.通过不同沉积微相和岩石类型与物性的相关性统计,显示具有如下特征:

潮坪微相孔隙度分布范围为 $0.8\% \sim 10.2\%$,平均值为 3.32% ,大于 3.0% 的样品占 56.0% ;渗透率分布范围为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 12.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.87 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,接近半数的样品小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品仅占 5.6% .泻湖微相孔隙度分布范围为 $0.3\% \sim 12.5\%$,平均值为 2.73% ,大于 3.0% 的样品占 31.7% ;渗透率分布范围为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $1.61 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,半数以上的样品小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品仅占 6.8% .潮下静水泥微相孔隙度分布范围为 $0\% \sim 8.44\%$,平均值为 2.86% ,大于 3% 的样品占 39.5% ;渗透率分布范围为 $0.0001 \times 10^{-3} \sim 21.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.86 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,极大多数样品小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品仅占 3.5% .粒屑滩微相孔隙度分布范围为 $1.12\% \sim 19.6\%$,平均值为 6.17% ,大于 5% 的样品占 63.2% ;渗透率分布范围为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $3.78 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,近半数的样品大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 37.3% ,大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 11.8% (图 5).从各微相类型的物性特征对比分析可知,粒屑滩物性仍明显高于其他微相类型,为有利储集微相类型,而潮下静水泥由于富含灰泥基质而堵塞孔隙通道而导致渗透率最差,泻湖和潮坪由于对白云石化作用提供了较有利沉积成岩环境,渗透率相对潮下静水泥较高,但总体上此 3 类微相孔隙度和渗透率普遍较低,一般不利于储层发育.

5.2 白云石化作用对储层发育的控制

川东黄龙组好的储层几乎全为白云岩类,即使是

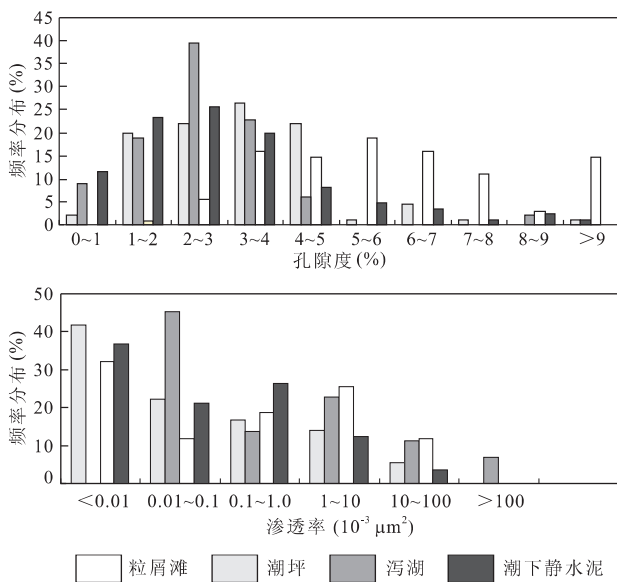


图 5 川东黄龙组不同储集微相物性分布直方图

Fig. 5 Physical property histogram of different reservoir microfacies of Huanglong Formation in eastern Sichuan basin

岩溶角砾岩,也以白云质岩溶角砾岩的储集物性为更好,而灰质岩溶角砾岩的储集性明显差于白云质岩溶角砾岩,表明岩溶型储层的发育均与白云石化作用息息相关.因此,白云石化作用的发育程度、发育时期和产出特征无疑是控制储层发育的重要因素.

黄龙组碳酸盐岩白云石化作用具有多期次和多成因特点,主要集中在成岩早期,而晚成岩期白云石化作用不明显.按结构—成因特征可划分为 4 种类型:(1)准同生期白云岩:岩性主要为微晶白云岩,白云石晶体大小为 $0.003 \sim 0.004 \text{ mm}$,有序度较差,呈他形粒状结构,但往往含有较多杂质和有机质,或发育有藻纹层和残余藻屑纹层结构,偶见含石膏或石膏假晶结构,系准同生期萨勃哈环境高镁卤水交代碳酸盐沉积物的产物,由于此类白云岩很致密,面孔率普遍 $<1\%$,对储层发育不利;(2)早成岩期埋藏白云岩:岩性主要为粉晶颗粒白云岩和溶孔状白云岩,晶体大小一般为 $0.03 \sim 0.15 \text{ mm}$,大小较均匀,以半自形—自形晶为主,有序度中等偏高,显微镜下白云石较脏,往往具有雾心亮边结构和重结晶现象,为正常海相沉积的灰岩在成岩期埋藏环境中被富镁孔隙流体交代的产物.此类型大部分发育在浅滩微相中,是川东地区黄龙组最重要的储层岩石类型,晶间孔和晶间溶孔普遍较发育,面孔率普遍 $>5\%$,对储层发育非常有利;(3)中成岩埋藏白云岩:具有伴随溶蚀作用与淡水沉积物充填作用同时进行和逐渐以重结晶作用为主的特点,是研究区黄龙组重要的储

层岩石类型之一。白云石晶体呈半自形—自形菱面体,重结晶作用明显,一般呈粉—细晶结构,表面脏,白云石有序度高,晶间孔和晶间溶孔较发育,面孔率一般在5%~20%之间。该类型白云岩受古岩溶作用的持续影响可形成极好的储层;(4)淡水白云石:此类型形成于古表生期,晶体大小一般为0.1~0.2 mm,具有明亮干净和自形程度好等特征,有序度 ≤ 1 ,在溶蚀孔、洞、缝中常呈晶簇状产出,因数量少,对储层发育无影响。

5.3 古岩溶作用对储层发育的控制

上石炭统黄龙组沉积后,受云南运动影响整个川东抬升为陆,进入区域性的古岩溶作用,形成广泛发育的古风化壳和相应的古岩溶岩体系,以及整个四川盆地东部极其重要的黄龙组古岩溶型储层(郑荣才等,2003,2008;胡忠贵等,2008;文华国等,2009a)。古岩溶作用扩大了储层分布范围和发育规模,并提高了储层质量,对储层发育也具有重要的影响,是形成油

气储层的重要机制之一 (James and Choquette, 1988; 郑荣才等, 1996; McMechan *et al.*, 1998, 2002; Loucks, 1999; 夏日元等, 1999; Loucks *et al.*, 2004; 阿不都热和曼·艾合买提江等, 2008; Breesch *et al.*, 2009), 主要表现在以下几个方面:

(1) 采用以描述岩溶旋回叠加期次、溶蚀方式和溶蚀强度为重点内容的“溶蚀段”概念(郑荣才等, 2003), 将黄龙组古岩溶剖面划分为 4 个溶蚀段(图 6), 自上而下依次为地表溶蚀段、上部溶蚀段、下部溶蚀段和底部溶蚀段, 其中的上部溶蚀段和下部溶蚀段是古岩溶储层的主要发育段, 分别对应与生产实践中广泛应用的上部储层发育段和下部储层发育段。古岩溶储层的发育主要受多期岩溶改造作用控制, 储层主要分布于受多期次岩溶改造的、以渗流和潜流叠加溶蚀作用为主的上部溶蚀段中下部和下部溶蚀段中上部(图 6), 储集类型以裂缝—孔隙型储层为主, 部分为大缝大洞型储层, 而底部溶蚀段孔隙

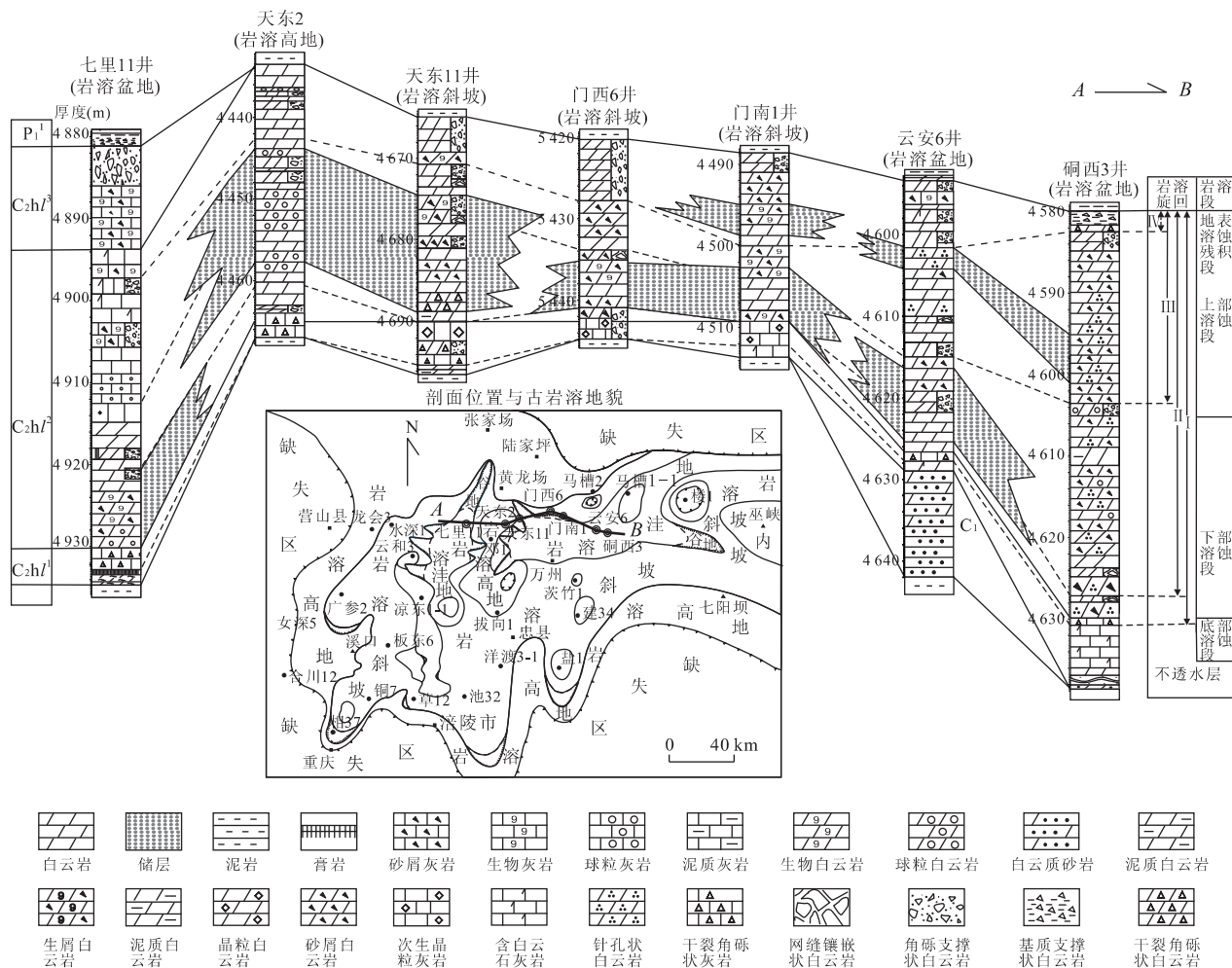


图6 川东黄龙组古岩体系溶蚀段格架和储层分布与对比

Fig. 6 Palaeokarst cycles and comparison diagram of reservoir of Huanglong Formation in eastern Sichuan basin

型储层基本不发育,仅发育少量的裂缝型储层。由此可见,古岩溶作用的多期次性、溶蚀作用的分带性及其叠加溶蚀作用,对古岩溶储层在纵横向上的发育规模和分布规律都有直接的控制作用。

(2)不同的岩溶地貌单元具有不同的古水文地质条件,并对岩溶和储层发育起着重要控制作用,古岩溶地貌直接影响到碳酸盐岩次生储集空间的形成和展布。具体阐述如下:

①岩溶高地对储层发育的控制。岩溶高地因溶蚀底界远高于潜水面,因而以渗流溶蚀为主,不同类型的岩溶高地溶蚀特征有显著差别:(a)坡内岩溶高地,因受水面积小和地形陡峻,以接受地表水下渗溶蚀作用为主,为较有利储层发育的微地貌单元,但往往因 C_2hl^2 段被强烈剥蚀,所保存的储层厚度较薄;(b)与古陆相毗邻的周边岩溶高地,因接受大气降水面积大,地形平坦,因而下渗水量相对较大,渗流溶蚀作用更为强烈,在 C_2hl^2 段白云岩保存厚度较大和颗粒或晶粒白云岩较发育的部位,抑或裂缝相对密集的部位均有利于储层发育。

②岩溶上斜坡对储层发育的控制。岩溶上斜坡微地貌单元以坡地为主,次为残丘,其中坡地具较陡地形,一般以底部不整合面为侵蚀底界面,位置仍高于潜水面,有利于周边或坡内岩溶高地的地表水快速下渗和侧向运移排泄,溶蚀作用强烈而充填作用较弱。由于地下水的补给量受季节性降水量变化影响大,岩溶旋回的潜水面位置不稳定,因此以发育较厚的渗流带和较薄的活跃潜流带为主,很少出现静滞潜流带。又由于各岩溶旋回之间的潜水面间断性下降幅度小,各岩溶旋回的叠加溶蚀作用最为强烈,甚至上部和下部溶蚀段可发育于相重叠的同一位置,因而岩溶上斜坡是各岩溶地貌单元中储层最发育的部位。

③岩溶下斜坡对储层发育的控制。岩溶下斜坡微地貌单元最复杂,包括坡地、坡内残丘、溶谷和浅洼以及浅洼内残丘等组合类型,各微地貌单元的溶蚀特征差异很大:(a)溶谷,具很陡的地形,在近谷口的部位活跃潜流带发育厚度相对较大,为有利古岩溶型储层发育的部位;(b)坡内残丘,在平缓下倾的坡地中呈广泛分布的峰丛状,如同坡内岩溶高地,也为有利于储层发育的微地貌单元,但规模要小得多;(c)浅洼,呈自上而下由陡变缓和底部平坦的盆状地形,地下水补给量和聚集量大于其他微地貌单元,但运移速度缓慢,潜水面较稳定,溶蚀作用相对较弱而胶结充填作用较强,属于不太有利于储层发育的微地貌单元;(d)

浅洼内残丘,在平坦的盆状地形中呈异峰突起状,地下水动力场分带性明显,自上而下具有渗流带趋于减薄而活跃潜流带和静滞潜流带同步加厚的特点。岩溶过程中各旋回之间的潜水面间隔幅度较大,明显受间歇性下降的区域性侵蚀基准面控制,因而浅洼内残丘的上部和下部具有相对独立的储层发育位置。从总体上看,该地貌单元储层发育的优劣状况依次为坡内残丘、浅洼内残丘、溶谷和浅洼。

④岩溶盆地对储层发育的控制。岩溶盆地由岩溶槽地和盆内残丘微地貌单元组成:(a)岩溶槽地由于地形平坦,地表长年被水淹没而不发育渗流带,地下水流动缓慢,易于对 $CaCO_3$ 过饱和,化学胶结物的沉淀作用较强,因此对形成古岩溶型储层不利,仅在岩溶谷口的边缘,或围绕残丘和漏斗边缘,因受到侧向运动的潜流溶蚀影响,可形成范围有限的水平溶蚀带而有利储层发育;(b)盆内残丘,特征类似于浅洼内残丘,但规模要大得多,残丘的主体处于较厚的上部渗流带和下部活跃→静滞潜流带和叠置部位,因此对储层发育较为有利。

(3)由于受季节性降水量和下蚀作用的影响,渗流带和潜流带不断向地层深部迁移,并对应每一次小规模的结构抬升或下蚀引起的侵蚀基准面向下迁移,对应输导层的潜水位附近,由顶蚀和侧蚀作用形成某一层级的水平洞穴,周而复始,最终形成多层次的水平洞穴和渗流溶蚀带的交替发育特点,其中尤以受渗流和潜流影响最大,潜水位最不稳定的岩溶斜坡带垂直渗流和水平潜流的交替溶蚀作用最发育,为有利于古岩溶储层发育的位置。

5.4 沉积—成岩系统与储层发育的耦合关系

综合上述沉积和不同成岩阶段、成岩环境特征以及不同成岩作用方式对储层发育控制作用,结合成岩流体性质研究(郑荣才和陈洪德,1997;郑荣才等,1997,2008;李忠等,2006,李忠和刘嘉庆,2009;文华国,2009b),认为川东黄龙组储层发育主要受沉积微相分布及成岩系统控制;按“水文体制”与相对应的成岩作用方式、成岩演化阶段和相对应的地质作用产物与组合特征,可将川东黄龙组碳酸盐岩储层划分出孔隙水、压实卤水、大气水和温压水 4 个不同阶段和物理化学环境,但连续演化的成岩系统,并认为沉积—成岩系统与储层在时空上具有良好的耦合关系,表现为:

(1)粒屑滩沉积微相控制了黄龙组储层的区域分布;(2)准同生成岩阶段虽然发生白云石化作用,但多数形成泥微晶白云岩,孔隙度平均值 $< 2\%$,而

占主导的压实作用、压溶作用和胶结作用使得原生的粒间孔和粒内孔大部分被充填而孔隙不发育,一般不能形成储层;(3)早—中成岩阶段的压实卤水成岩系统中,虽然压实、压溶和进一步的胶结作用使原生孔隙大部分遭到彻底破坏,但来自于早期萨勃哈环境封存的地层压实卤水流体所形成的大范围埋藏白云石化及重结晶作用有利于晶间孔的发育,并具有伴随埋藏白云石化强度加大而逐渐更有利于储层发育的特点;(4)古表生期大气水成岩系统以大气水强烈溶蚀作用为主,可形成特征的岩溶型储层,其中经大气水溶蚀改造后未角砾岩化的溶孔晶粒和颗粒白云岩粒间溶孔和晶间溶孔、超大溶孔与溶洞、溶缝都非常发育,为最有利储层发育的岩性;由大气水溶蚀形成的白云质岩溶角砾岩中各类溶蚀孔、洞、缝也很发育,为有利储层发育的岩性;而同样由大气水溶蚀和去膏去云化作用形成的次生晶粒灰岩和岩溶角砾岩孔隙度非常低,平均值为小于 2%,不能作为储层;(5)在随后的二叠纪—侏罗纪末,川东石炭系处于再埋藏成岩阶段的温压水成岩系统,中二叠世末的海西晚期东吴运动拉张构造背景下,石炭系地层水向负压的裂缝系统中流动,同时也有深部的热液向上流动而形成混合液,并进行胶结、压实、压溶、重结晶和局部的溶蚀、交代和充填等成岩改造而使储层物性变差,但晚印支—燕山运动期,不仅发育了大量 NE 向的通源深大断裂,而且志留系的有机质在热成熟期间生成了大量以有机酸为主的压释水,进一步溶蚀扩大了储集空间,对川东石炭系有效储集空间的形成起到了十分重要的作用,晚燕山—喜山期波及全盆地的褶皱运动形成了现今构造的基本格局,岩石受应力作用而产生了构造缝,对改善储层的孔、渗性影响很大,如发育有构造裂缝的储层平均孔隙度可增加 0.5%~1.0%,使渗透率呈几何级数增长,可形成有效的裂缝型储层。

6 结论

(1)川东黄龙组主要发育萨勃哈、有障壁海岸和陆棚 3 个相带以及特殊的古喀斯特相,并具有自东向西和自北向南,由盆外低地向盆内高地和周缘古陆方向逐层上超和减薄的沉积演化格局。

(2)储集岩类型以白云质岩溶角砾岩及颗粒白云岩为主,有效的储集空间类型主要为晶间孔、晶间溶孔,最重要的储集层类型为孔洞缝型。

(3)构造、气候、岩性、层位、古地形、古水文条件

和不同的岩溶地貌形态影响和控制着古岩溶储层的发育与区域分布,以岩溶上斜坡中的坡地和残丘微地貌单元为最有利储层发育部位,浅洼内和盆内残丘为较有利储层发育部位,而岩溶高地、洼地和槽地一般不利储层发育。

(4)沉积—成岩系统与储层在时空上具有良好的耦合关系,粒屑滩沉积微相控制了黄龙组储层的区域分布,早—中成岩阶段压实卤水成岩系统、古表生期大气水成岩系统以及埋藏成岩阶段的温压水成岩系统对优质储层发育贡献最大。

References

- Abdurahman, A., Zhong, J. H., Li, Y., et al., 2008. Study on effect between karstification and fracture in carbonate rocks. *Geological Review*, 54(4): 485—493 (in Chinese with English abstract).
- Breesch, L., Stemmerik, L., Wheeler, W., et al., 2009. Fluid flow reconstruction in a complex paleocave system reservoir in Wordiekammen, Central Spitsbergen. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(1): 10.
- Fan, A. P., Han, Z. Z., Yang, R. C., et al., 2009. Study on sedimentary microfacies and diagenesis of Shanghe sand bodies in Huimin sag. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 28(1): 14—19, 50 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H., 1993. Burial hill palaeokarst and its controlled reservoir heterogeneity in Ordovician, Lunnan region of Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 11(1): 56—64 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y. H., 1994. The pool-formed rule of natural gas and diagenesis of Carboniferous reservoir in East Sichuan. *Journal of Southwest-China Petroleum Institute*, 16(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. G., Zheng, R. C., Wen, H. G., et al., 2008. Dolostone genesis of Huanglong Formation of Carboniferous in Linshui of eastern Sichuan-northern Chongqing area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1369—1378 (in Chinese with English abstract).
- James, N. P., Choquette, P. W., 1988. *Paleokarst*. Springer Verlag, New York.
- Jiao, Y. Q., Lü, X. B., Wang, Z. H., et al., 2004. Two distinct geological environments from sedimentary to diagenesis stages: examples from sandstone-type Uranium deposits, Turpan-Hami basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 615—620 (in Chinese with English abstract).
- Kerans, C., 1988. Karst-controlled reservoir heterogeneity in

- Ellenburger Group Carbonates of West Texas. *AAPG Bulletin*, 72(10): 1160—1183.
- Li, C., 1998. Carbonate rock diagenesis of Upper Carboniferous in the East of Sichuan Province. *Journal of the University of Petroleum*, 22(5): 19—22 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., 1990. Some progresses and tendencies in diagenesis research. *Geological Science and Technology Information*, 9(3): 15—19 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., 1998. Mantle fluids and magma origin of basalts and alkaline rocks. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 157—158 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Han, D. L., Shou, J. F., 2006. Diagenesis systems and their spatio-temporal attributes in sedimentary basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2151—2164 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Liu, J. Q., 2009. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution in sedimentary basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 837—848 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., 2009. Some problems on the study of sedimentary diagenesis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 787—791 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Zhang, J. Q., 1992. Sedimentary diagenesis. Science Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, M. H., Zhao, J. L., Ji, Y. L., et al., 1993. Diagenesis model and evolution characteristics in reservoirs of elastic rock. Petroleum University Publishing House, Dongying (in Chinese).
- Loucks, R. G., 1999. Paleocave carbonate reservoirs; origins, burial-depth modification, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bulletin*, 83(11): 1795—1834.
- Loucks, R. G., Mescher, P. K., McMechan, G. A., 2004. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas. *AAPG Bulletin*, 88(5): 545—564.
- McMechan, G. A., Loucks, R. G., Mescher, P., et al., 2002. Characterization of a coalesced, collapsed paleocave reservoir analog using GPR and well core data. *Geophysics*, 67(4): 1148—1158.
- McMechan, G. A., Loucks, R. G., Zeng, X. X., et al., 1998. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, Central Texas. *Journal of Applied Geophysics*, 39(1): 1—10.
- Meng, Y. L., Wang, Z. G., Yang, J. S., et al., 2003. Comprehensive process-oriented simulation of diagenesis and ITS application. *Experimental Petroleum Geology*, 25(2): 211—215 (in Chinese with English abstract).
- Milliken, K. L., 2003. Diagenesis. In: Middleton, G. V., ed., Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks. Kluwer Academic Publishers, London, 214—219.
- Wang, R. F., Sun, W., 2009. Main factors controlling the evolution of physical properties during the process of reservoir sedimentation-diagenesis. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(3): 399—404 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. G., Wen, Y. C., Liu, Z. J., 1996. Palaeokarst and burial corrosion in porous evolution of carbonate rock reservoirs of Carboniferous in East Sichuan. *Natural Gas Industry*, 16(6): 18—24 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Shen, Z. M., et al., 2009a. Study on the Carboniferous palaeokarst landform in eastern Sichuan basin. *Geological Review*, 55(6): 816—827 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Shen, Z. M., et al., 2009b. Geochemical characteristics of strontium isotope of the Palaeokarst reservoirs in the Huanglong Formation at the margin of southern Daba Mountain. *Journal of Jilin University (Natural Science Edition)*, 39(5): 789—795 (in Chinese with English abstract).
- Xia, R. Y., Tang, J. S., Guan, B. Z., et al., 1999. Ordovician palaeokarst landform in Ordos basin and gas enrichment characteristics. *Oil & Gas Geology*, 20(2): 133—136 (in Chinese with English abstract).
- Xian, B. Z., Wu, Z. G., Jiang, Z. X., et al., 2004. Research evolution and development direction in the early diagenesis. *Journal of the University of Petroleum, China*, 28(6): 133—139 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Zheng, R. C., Wen, H. G., et al., 2010. Palaeokarst feature and reservoir distribution of Huanglong Formation of Carboniferous of eastern Sichuan. *Petroleum Exploration and Development* (in press).
- Zhang, S. B., Wang, Q., Li, X. Y., et al., 2009. Depositional-diagenetic coupling complex of Xujiahe sandstone in Hebaoshan block in the south part of the Central Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 225—231 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. M., Li, H., Zhu, Y. S., 2005. A study on sedimentary diagenesis in Santanghu basin in Xinjiang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 35(6): 793—798 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Chen, H. D., 1997. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements of paleokarst reservoirs in Huanglong Formation of eastern Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology*, 24(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Chen, H. D., Zhang, S. N., et al., 1997. Stable isotopic characteristics of karst-reservoirs in Huanglong

Formation from eastern Sichuan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 424—428 (in Chinese with English abstract).

Zheng, R. C., Dang, L. R., Wen, H. G., et al., 2010. Diagenetic system of carbonate reservoir in Huanglong Formation from East Sichuan to North Chongqing area. *Acta Petrolei. Sinica*, 31(2): 237—245 (in Chinese with English abstract).

Zheng, R. C., Hu, Z. G., Zheng, C., et al., 2008. Geochemical characteristics of stable isotopes in paleokarst reservoirs in Huanglong Formation in northern Chongqing-eastern Sichuan area. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 303—311 (in Chinese with English abstract).

Zheng, R. C., Li, D. M., Zhang, S. N., 1995. A Study on sequence stratigraphy of the Huanglong Formation, Upper Carboniferous in eastern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13 (Suppl.): 1—9 (in Chinese with English abstract).

Zheng, R. C., Peng, J., Gao, H. C., 2003. Palaeokarst-related characteristics and cycles of carbonate reservoirs in Huanglong Formation, Upper Carboniferous, eastern Chongqing. *Geology Geochemistry*, 31(1): 28—35 (in Chinese with English abstract).

Zheng, R. C., Zhang, S. N., Li, D. M., 1996. Origin and researching significance of breccias in the Upper Carboniferous Huanglong Formation, eastern Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology*, 23(1): 8—18 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

阿不都热和曼·艾合买提江, 钟建华, 李阳, 等, 2008. 碳酸盐岩裂缝与岩溶作用研究. *地质论评*, 54(4): 485—493.

樊爱萍, 韩作振, 杨仁超, 等, 2009. 惠民凹陷商河砂体沉积微相与成岩作用研究. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 28(1): 14—19, 50.

郭建华, 1993. 塔里木盆地轮南地区奥陶系潜山古岩溶及其所控制的储层非均质性. *沉积学报*, 11(1): 56—64.

郭一华, 1994. 川东地区石炭系储层成岩作用与天然气成藏规律. *西南石油学院学报*, 16(1): 1—10.

胡忠贵, 郑荣才, 文华国, 等, 2008. 川东邻水—渝北地区石炭系黄龙组白云岩成因. *岩石学报*, 24(6): 1369—1378.

焦养泉, 吕新彪, 王正海, 等, 2004. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境——吐哈盆地砂岩型铀矿研究实例. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(5): 615—620.

李淳, 1998. 川东地区上石炭统碳酸盐岩成岩作用. *石油大学学报(自然科学版)*, 22(5): 19—22.

李忠, 1990. 成岩作用研究的近期发展及其方向. *地质科技情报*, 9(3): 15—19.

李忠, 1998. 沉积盆地大尺度成岩作用研究. *地学前缘*, 5(3): 157—158.

李忠, 韩登林, 寿建峰, 2006. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性. *岩石学报*, 22(8): 2151—2164.

李忠, 刘嘉庆, 2009. 沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向. *沉积学报*, 27(5): 837—848.

刘宝瑞, 2009. 沉积成岩作用研究的若干问题. *沉积学报*, 27(5): 787—791.

刘宝瑞, 张锦泉, 1992. 沉积成岩作用. 北京: 科学出版社.

刘孟慧, 赵激林, 纪友亮, 等, 1993. 碎屑岩储层成岩作用模式及其演化特征. 东营: 石油大学出版社.

孟元林, 王志国, 杨俊生, 等, 2003. 成岩作用过程综合模拟及其应用. *石油实验地质*, 25(2): 211—215.

王瑞飞, 孙卫, 2009. 储层沉积—成岩过程中物性演化的主控因素. *矿物学报*, 29(3): 399—404.

王一刚, 文应初, 刘志坚, 1996. 川东石炭系碳酸盐岩储层孔隙演化中的古岩溶和埋藏溶解作用. *天然气工业*, 16(6): 18—24.

文华国, 郑荣才, 沈忠民, 等, 2009a. 四川盆地东部黄龙组古岩溶地貌研究. *地质论评*, 55(6): 816—827.

文华国, 郑荣才, 沈忠民, 等, 2009b. 南大巴山前缘黄龙组古岩溶储层锶同位素地球化学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(5): 789—795.

夏日元, 唐健生, 关碧珠, 等, 1999. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征. *石油与天然气地质*, 20(2): 133—136.

鲜本忠, 吴战国, 姜在兴, 等, 2004. 早期成岩作用研究进展及发展方向. *石油大学学报(自然科学版)*, 28(6): 133—139.

张兵, 郑荣才, 文华国, 等, 2010. 川东地区黄龙组古岩溶特征与储层分布. *石油勘探与开发(待刊)*.

张胜斌, 王琪, 李小燕, 等, 2009. 川中南河包场须家河组砂岩沉积—成岩作用. *石油学报*, 30(2): 225—231.

张育民, 李红, 朱玉双, 2005. 新疆三塘湖盆地沉积成岩作用研究. *西北大学学报(自然科学版)*, 35(6): 793—798.

郑荣才, 陈洪德, 1997. 川东黄龙组古岩溶储层微量和稀土元素地球化学特征. *成都理工学院学报*, 24(1): 1—7.

郑荣才, 陈洪德, 张哨楠, 等, 1997. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(4): 424—428.

郑荣才, 党录瑞, 文华国, 等, 2010. 川东—渝北黄龙组碳酸盐岩储层的成岩系统. *石油学报*, 31(2): 237—245.

郑荣才, 胡忠贵, 郑超, 等, 2008. 渝北—川东地区黄龙组古岩溶储层稳定同位素地球化学特征. *地学前缘*, 15(6): 303—311.

郑荣才, 李德敏, 张哨楠, 1995. 川东黄龙组天然气储层的层序地层学研究. *沉积学报*, 13(增刊): 1—9.

郑荣才, 彭军, 高红灿, 2003. 渝东黄龙组碳酸盐岩储层的古岩溶特征和岩溶旋回. *地质地球化学*, 31(1): 28—35.

郑荣才, 张哨楠, 李德敏, 1996. 川东黄龙组角砾岩成因及其研究意义. *成都理工学院学报*, 23(1): 8—18.